干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

秦岭南北潜在蒸发与气温响应关系及其影响因素

王晓萌[1,2]，延军平[1,2]，李双双[1,2]，晏德莉[1,2]，万 佳[1,2,3]

（1 陕西师范大学，陕西 西安 710119； 2 陕西师范大学地理国家级实验教学示范中心，陕西 西安 710119； 3 北方民族大学，宁夏 银川 750021）

摘 要： 蒸发是水文循环的重要组成部分，精细化蒸发变化与气象要素的响应关系，对中国重要生态过渡带水资源、生态恢复重建以及社会经济的可持续发展具有重要意义。基于1970—2017年70个气象站点观测数据，辅以趋势分析和小波相干方法，对秦岭南北气温和潜在蒸发（ET_0）变化特征进行分析，探讨气象要素与ET_0的响应关系。结果表明：以滑动相关方法为基础，无论是滑动窗口调整，还是去趋势序列，气温与ET_0均呈现正相关关系，说明秦岭南北气温上升，ET_0增加；但是，秦岭南北气温与ET_0相关关系存在时空差异。以1993年为时间节点，前期气温和ET_0相关性呈现增加趋势，后期则逐渐减弱；空间上西秦岭地区是气温和ET_0的弱相关区。在主导因素上，ET_0对太阳辐射变化更为敏感，风速并非区域ET_0变化的主导因素，从而导致"蒸发悖论"现象并不突出。多因素主导ET_0变化，是秦岭南北ET_0与气温响应关系存在时空差异的原因。

关 键 词： 气候变化；潜在蒸发；蒸发悖论；趋势分析；秦岭南北

文章编号：

作为能量平衡和水循环的联系通道，潜在蒸发（ET_0）是反映气候变化和水循环活动的重要指标[1-4]。IPCC在2018年发布关于全球变暖1.5 ℃特别报告，指出受人类活动影响，1880—2012年全球气温上升0.83 ℃，全球变暖已成为不争事实[5]。与人们预期的气候变暖导致ET_0增加不同，众多研究表明，随着全球变暖，ET_0反而下降[6-11]。RODERICK等[12]将这种随着温度上升，ET_0与气温呈逆向关系的现象称为"蒸发悖论"。

近年来，"蒸发悖论"现象在世界范围内得到验证，如澳大利亚、乌拉圭、斯洛文尼亚等，也在中国秦岭南北、农牧交错带、黄土高原、黄河流域、塔里木河流域、海河流域等典型地理单元进行探讨[13-23]。在"蒸发悖论"研究方法上，前期多数研究通过累计距平或气候倾向率，分析气温与ET_0的关系，探讨"蒸发悖论"以及影响蒸发的因素。由于气候变化是一个复杂的、非线性的过程，简单线性方法势必导致ET_0响应结论存在不确定性[24]。因此，选取典型区域，使用非线性方法和多时间窗口滑动，关注ET_0与气温响应关系的时空差异，可为再认识ET_0与气温响应关系提供新的视角。

秦岭位于中国东部季风区，不仅是中国南北方的地理分界线和水文气候过渡带，也是生态环境脆弱区和气候变化敏感区[25-27]。近些年，对秦岭山地生态环境和气候变化的关注越来越多，以秦岭南北过渡带为整体的研究相对较少[27]；同时，前期研究中，对蒸发与气温关系探讨多为线性对应关系，关注两者多周期响应特征相对较少[28]。基于此，本文采用趋势分析和小波相干等气候诊断方法，对1970—2017年秦岭南北气温和ET_0趋势变化进行分析，再讨论气温与ET_0相关性的时空变化，以期为理解中国南北过渡带蒸发与气温响应关系提供理论基础。

1 研究区概况

秦岭作为我国中部地区东西向山脉，北坡陡

收稿日期： 2019-10-11； **修订日期：** 2020-06-09
基金项目： 国家自然科学基金项目(41877519，41871187)
作者简介： 王晓萌（1995-），女，河北邢台人，硕士研究生，研究方向为气候变化与区域灾害研究. E-mail: wangxm110402mm@163.com
通讯作者： 李双双（1988-），男，陕西潼关人，讲师，主要研究方向为全球变化与区域灾害防治. E-mail: lss40609010@126.com

峻，南坡平缓。由于秦岭山脉对水热的阻滞作用，使秦岭南北形成不同气候和自然环境。其中，秦岭以北属于暖温带半湿润气候，植被以落叶阔叶林为主；秦岭以南属于北亚热带湿润气候，以常绿落叶阔叶混交林为主。从气候分析角度来看，以分水岭作为秦岭南北分界线不能准确概括秦岭南北气候特征，以"略阳—黑河坝—马道—金水河—宁陕—柴家坪—山阳—竹林关—商南"一线，作为秦岭北亚热带和暖温带的分界线，既符合生物演替规律，又完整保持秦岭南北垂直分异规律[29]。因此，本文选择分水岭、秦岭南麓1 000 m作为秦岭南北的界限，将秦岭南北划分为：秦岭以北、秦岭南坡、汉江谷地3个子区域[25]（图1）。

2 数据与方法

2.1 数据来源

本文气象数据来自于中国气象数据网（http://data.cma.gov.cn）。由于20世纪60年代秦岭南北部分站点缺测数据较多，为保证数据的连续性，将研究时段确定为1970—2017年。利用秦岭南北70个气象站点逐日平均温、最高温、日照时数、相对湿度、平均风速等气象资料，计算出各气象站点的日潜在蒸发量。考虑到建站时间和迁站等问题，对缺失数据进行插值，具体插值方法参见文献[30]。

2.2 研究方法

2.2.1 Penman-Monteith公式 1998年，联合国粮农组织将潜在蒸发量定义为：高度为0.12 m，表面阻力为70 s·m^{-1}，反射率0.23，表面开阔，高度均匀，生长旺盛并充分供水条件下，绿草冠层的作物蒸腾和蒸发量。本文采用FAO修订的Penman-Monteith公式对秦岭南北ET_0进行计算，具体计算公式参见文献[31]。

2.2.2 小波相干分析 小波分析方法是传统的线性平稳信号的突破，可在多尺度上将信号进行分解，具有自适应分辨率的特点，弥补了傅立叶法的不足[32]。小波相干则是将小波分析与交叉谱结合，可分析时频域上2个序列的相互关系，且通过红噪声检验，使研究结果更具可靠性[33]。小波相干分析公式如下：

$$R_n^2(s)=\frac{\left|S\left[s^{-1}W_n^{XY}(s)\right]\right|^2}{S\left[s^{-1}\left|W_n^X(s)\right|^2\right]\cdot S\left[s^{-1}\left|W_n^Y(s)\right|^2\right]} \tag{1}$$

式中：S是平滑器；s是伸缩尺度；$W_n^X(s)$、$W_n^Y(s)$分别为X、Y的小波变换；$W_n^{XY}(s)$为小波交叉谱。

2.2.3 潜在蒸发与气象要素的关系 "蒸发悖论"存在不确定性，既受研究方法影响，也源于多种气象要素共同作用，如风速、日照、相对湿度、气温等[24]。因此，构建综合相关系数，对秦岭南北气象要素与ET_0之间关系再认识，以反映秦岭南北不同分区ET_0受

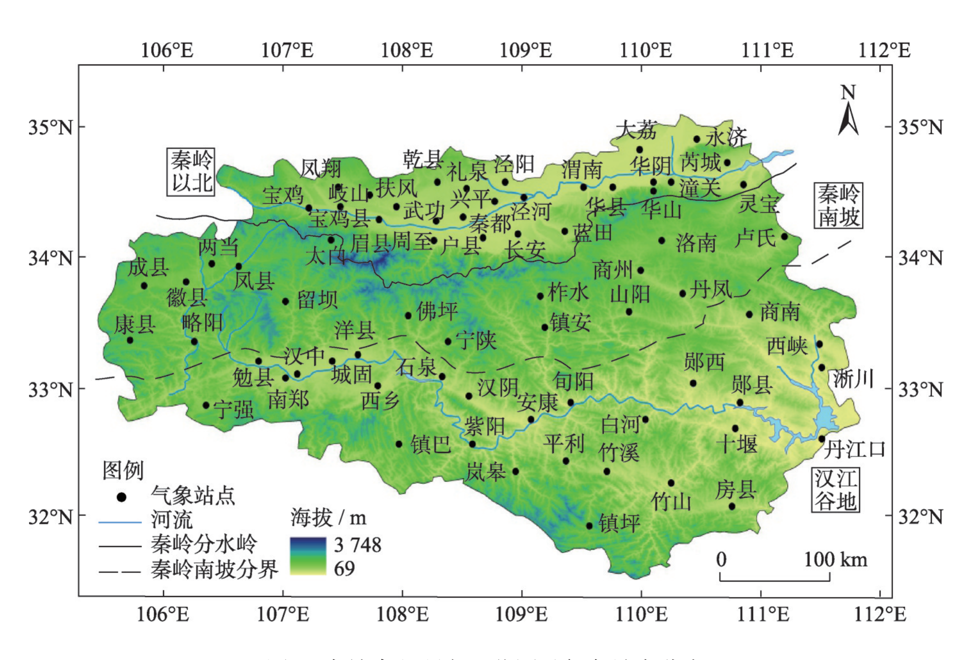


图1 秦岭南北研究区范围及气象站点分布

Fig. 1 Geographic environment and meteorological stations in the south and north of Qinling Mountains

气象因素影响的差异性，具体计算公式如下：

$$P = 0.2 \times Avg + 0.3 \times Std + 0.5 \times Prop \quad (2)$$

式中：P 为气象要素与 ET_0 综合相关系数，表征不同区域 ET_0 影响因素的差异；Avg 为区域各站点 ET_0 与气象要素相关系数的平均值，反映气象要素相关性的平均状态，值越高，说明两者相关性越好；Std 为区域各站点 ET_0 与气象要素相关系数的标准差，反映区域内站点相关性的离散程度。当 Std 越大时，说明气象要素与 ET_0 关系的不确定性越大；$Prop$ 为区域相关性通过0.01显著水平的站点比重。当 $Prop$ 值越大时，说明区域 ET_0 与气象因子相关性越好。其中，标准差为负向指标，均值和站点比重为正向指标，以0~1标准化消除不同量纲的影响。

3 结果分析

3.1 秦岭南北气温和 ET_0 变化背景

1970—2017年秦岭南北气温变化呈现增加趋势，ET_0 则维持年代波动，而且两者在年代际波动具有区域同步性(图2)。具体规律如下：

（1）气温。1970—2017年，秦岭以北年均温以0.323 ℃·(10 a)$^{-1}$ 速率呈上升趋势，高于秦岭南坡[(0.241 ℃·(10 a)$^{-1}$)]和汉江谷地增温趋势[(0.210 ℃·(10 a)$^{-1}$)]，说明气候变化背景下，秦岭以北的暖温带增温速度高于秦岭以南的山地暖温带、汉江谷地的北亚热带，也印证高纬度和山地气候变暖，高于低纬度和谷地、平原区(图2a)。

在年代变化上，利用10 a滑动平均方法，滤除气温曲线的年代际波动信息，秦岭南北3个分区年代波动同步性明显，可分3个阶段：1970—1984年，气温先升后降，在1984年形成一个低位谷值；1984—1998年为气温快速上升期，并在1993年后气温多数年份整体位于正距平；1999—2017年，气温维持高位波动，在2007—2012年小幅下降。与全球气温变化过程相比，秦岭南北3个分区2000—2012年气温增速减缓，甚至表现出下降趋势，符合变暖停滞特征。值得一提的是，2012年后秦岭南北气温快速上升，极端高温天气频发，说明区域经历短暂增温停滞后，未来10 a气温可能进入新的增速时期。

（2）潜在蒸发。1970—2017年，秦岭南北3个分区 ET_0 均呈现下降趋势，但下降幅度有所差异。其中，秦岭南坡 ET_0 下降最为明显，变化速率关系如下：秦岭以北[−0.37 mm·(10 a)$^{-1}$]<汉江谷地[−2.99 mm·(10 a)$^{-1}$]<秦岭南坡[−10.78 mm·(10 a)$^{-1}$]，且变化趋势通过0.05显著水平检验。与气温变化相反，低纬度、谷地区 ET_0 下降幅度高于高纬度、山地区(图2b)。

秦岭南北3个分区 ET_0 变化呈现同步性，1970—1984年 ET_0 平稳波动后持续下降；1984—1997年，与

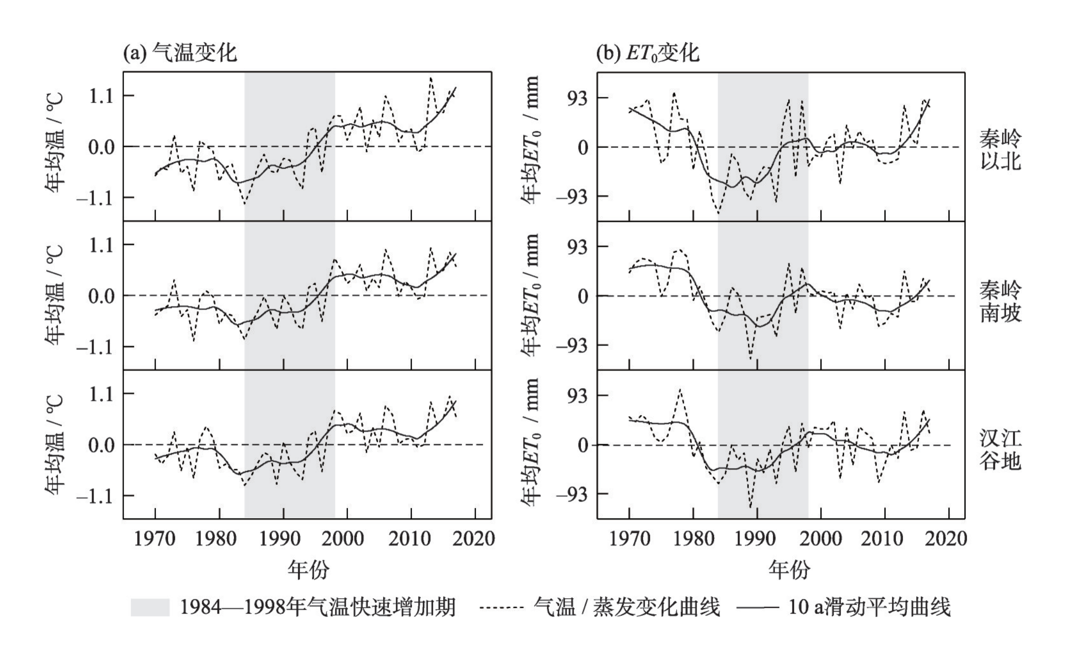


图2 1970—2017年秦岭南北气温与潜在蒸发 ET_0 变化特征

Fig. 2 Variations of temperature and ET_0 in the south and north of Qinling Mountains during 1970—2017

气温变化一致，为ET_0快速上升期，且在20世纪80年代形成谷值期；1998—2017年，为ET_0高位波动期，与变暖停滞相对应，2006—2012年形成谷值期。此阶段，秦岭南北3个分区变化差异主要表现为：秦岭南坡和汉江谷地ET_0下降幅度明显，而秦岭以北ET_0维持正负距平波动。2012年后秦岭南北3个分区ET_0呈现增加趋势。

3.2 秦岭南北ET_0与气温时空响应关系

3.2.1 秦岭南北ET_0与气温时间响应关系 经典分析方法中，线性趋势是"蒸发悖论"讨论的基础，但是线性趋势分析受研究阶段影响较大。以滑动相关为切入，选取21 a和11 a两个窗口期，对比去趋势和原始序列相关性差异，从新的角度再认识秦岭南北"蒸发悖论"现象（图3）。结果表明：1970—2017年秦岭南北不同分区气温和ET_0呈现显著的正相关，两者相关性通过0.05显著水平检验，说明区域气温上升时，ET_0往往呈上升趋势，不存在"蒸发悖论"现象。

在21 a滑动相关上，秦岭南北3个分区气温与ET_0相关性变化具有同步性，表现出"上升—下降—平稳"的变化过程（图3a）。与此同时，对比去趋势结果，发现1984—1998年快速增暖期，以1989年为节点，前期去趋势相关性明显提高，后期相关性则呈现出减弱趋势，2000年后，去趋势相关性再次升高；在空间上，汉江谷地相关性高于秦岭以北、秦岭南坡，而且1998年之前，汉江谷地与秦岭南坡变化过程更为相似，随后秦岭南坡和秦岭以北相似更强。

为了避免不同滑动窗口引起气温和ET_0结论的不确定性，再次计算11 a滑动相关，发现秦岭南北3个分区气温与ET_0正相关性并未发生实质变化（图3b）。与21 a滑动相关规律相比，仅是汉江谷地相关系数波动较小，秦岭以北和秦岭南坡相关系数波动较大。在变化过程上，原始序列相关分析表明，20世纪90年代初之前，秦岭以北、秦岭南坡和汉江谷地维持"双峰结构"，说明气温与ET_0正相关关系经历了"增强—减弱—增强"的变化过程，而20世纪90年代之后，秦岭以北、秦岭南坡气温和ET_0响应关系逐渐减弱，甚至1998—2008年两者相关性未通过0.05显著水平检验，而此时刻汉江谷地气温和ET_0正相关性维持稳定。上述相关性下降规律，在滤除气温和ET_0线性趋势后更加明显，特别是秦岭以北和秦岭南坡在1984—1998年快速增暖期，蒸发和气温相关性呈现快速下降。

值得一提的是，20世纪60～90年代，全球许多地区监测太阳辐射下降5.0%，这种现象被称为"全球变暗"，消除1993年前后中国气象站辐射观测仪器更换影响，辐射减少趋势持续到2005年，2005—2016年中国辐射增加速率6.13±1.77 $W\cdot m^{-2}\cdot(10\ a)^{-1}$[34]。辐射温度变化对蒸发量具有明显的影响，在秦岭以

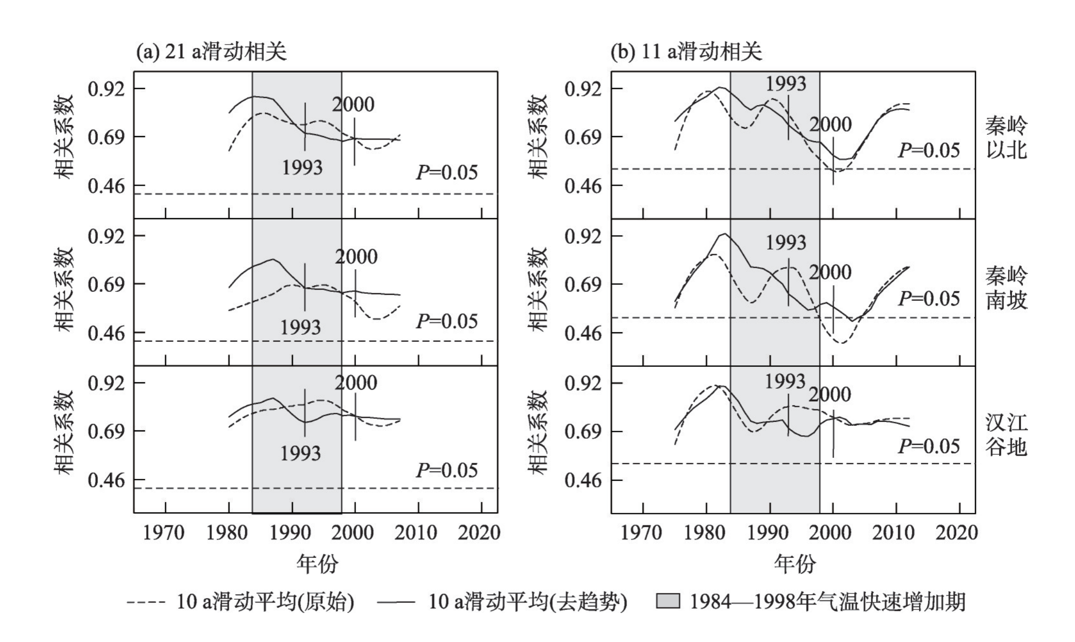


图3 1970—2017年秦岭南北气温与ET_0相关系数

Fig. 3 Correlation coefficients between temperature and ET_0 in the south and north of Qinling Mountains during 1970—2017

北、秦岭南坡ET_0与气温11 a滑动响应关系中体现的尤为明显，2005年之后两者响应关系逐渐增强。

3.2.2 秦岭南北ET_0与气温空间响应关系 无论原始序列，还是去趋势序列，基于区域站点平均数据进行滑动相关分析，易掩盖分区内部规律，忽略空间格局上的差异性。因此，结合空间经纬度和海拔信息，利用ANUSPLIN气候数据空间插值软件，对秦岭南北气温与ET_0相关系数、变化趋势进行空间插值。

1970—2017年，秦岭南北气温与ET_0响应关系整体呈现正相关，但是相关性存在空间分异（图4）。其中，相关性低值区主要位于秦岭南坡西段高海拔地区，高值区则位于关中平原、汉江谷地的东部。整体上，秦岭南坡站点相关性空间均一性要低于秦岭以北，这也是前文秦岭南坡气温与ET_0相关性低于秦岭以北和汉江谷地的主要原因。

对比去趋势序列，原始序列相关格局主要变化是：秦岭南坡西段和关中平原相关性有所降低，但是气温和ET_0空间格局呈现"东南高、西北低"并未发生实质变化，这再次说明认识秦岭南北"蒸发悖论"，需要关注气温和ET_0的年代相关特征，还需关注不同区域、不同阶段的演化。

从变化趋势角度分析，1970—2017年，秦岭南北气温和ET_0相关性呈现出"高相关区减弱，低相关区增加"的空间特征（图5）。其中，相关性增强区主要位于西秦岭嘉陵江流域两侧、大巴山和米仓山。同时，气温和ET_0相关性空间趋势格局具有稳定性，不受滑动窗口期和滤除趋势的影响。值得一提的是，秦岭山地高海拔地区降水观测数据较少，西秦岭和大巴山气温和ET_0响应关系加强还存在不确定性。已有研究发现，WRF模拟和卫星数据均显示秦岭降水与地形走向一致，主要水汽通道有3个，来自孟加拉湾由青藏高原东北侧、四川盆地输送秦岭地区，西太平洋来源经长江中下游输送[35]。孟加拉湾是秦岭地区夏季主要水汽来源，加之季风气候影响，使得西秦岭降水明显高于秦岭东部、秦岭以北。是否是降水下降导致日照时数增多、相对湿度下降、气温升高，引起ET_0与气温正相关关系增强，未来需要进一步验证。

3.3 秦岭南北ET_0与气象要素的响应关系

从气象要素与ET_0的相关关系分析，ET_0与最高

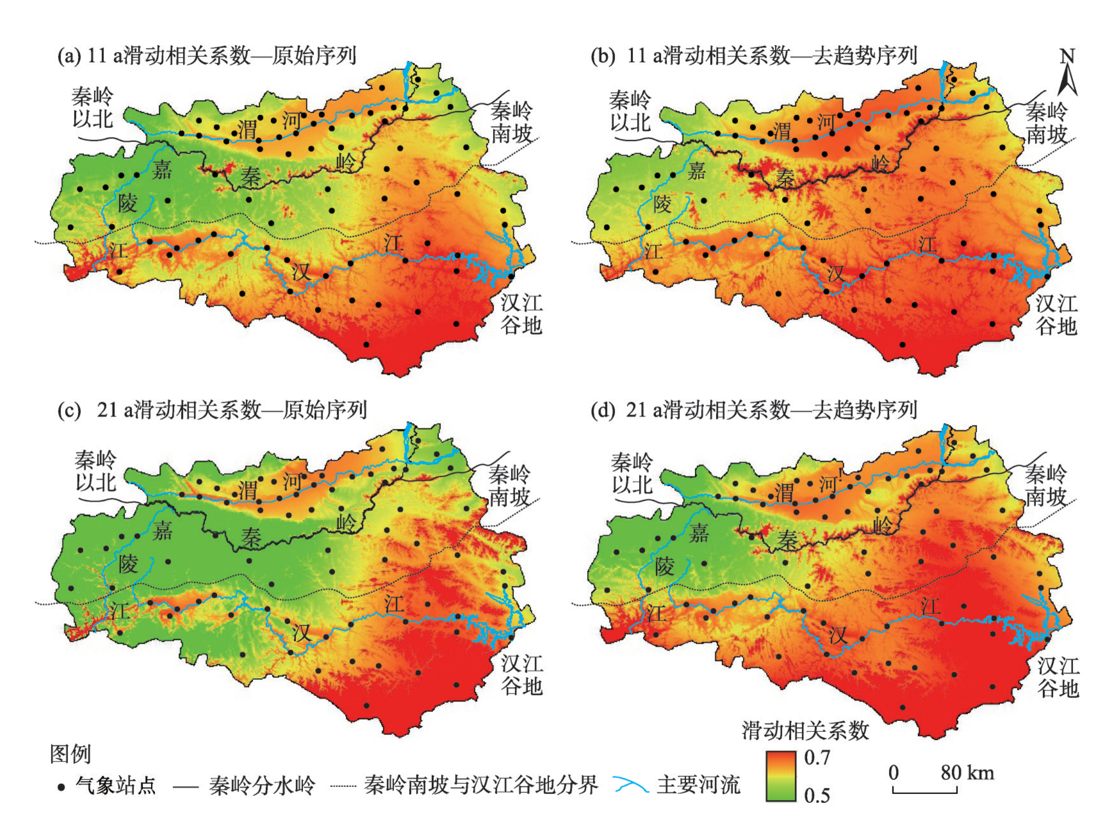


图4 1970—2017年秦岭南北气温与ET_0相关系数的空间格局变化

Fig. 4 Spatial variation of correlation coefficients between temperature and ET_0 in the south and north of Qinling Mountains during 1970—2017

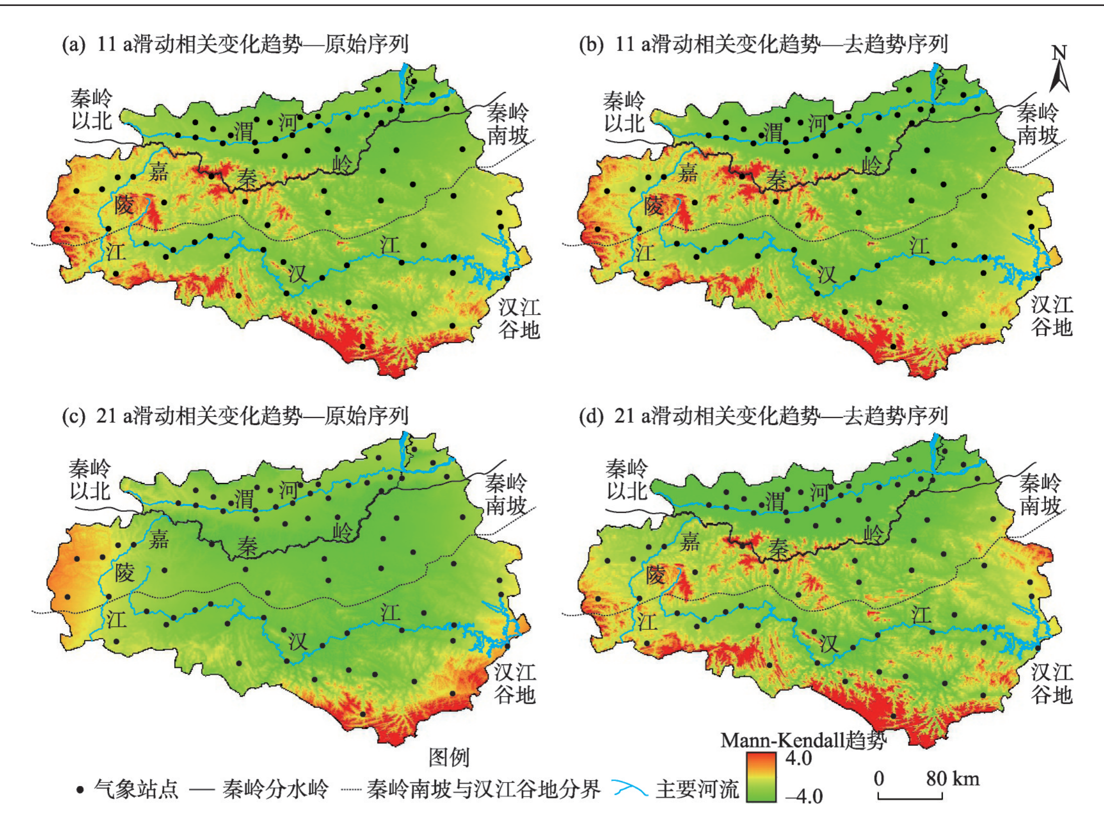


图5 1970—2017年秦岭南北气温与ET_0相关变化趋势的空间格局

Fig. 5 Spatial pattern of M-K trend of correlation coefficients between temperature and ET_0 in the south and north of Qinling Mountains during 1970—2017

表1 基于站点尺度的秦岭南北ET_0与气象要素相关性分析

Tab. 1 Correlation analysis of ET_0 and meteorological factors based on station scale in the south and north of Qinling Mountains

分区	指标	相对湿度	最高温	年均温	日照时数	平均风速
秦岭以北	*Avg*	−0.65/−0.71	0.53/0.69	0.47/0.65	0.66/0.69	0.57/0.63
	Std	0.18/0.16	0.16/0.11	0.18/0.11	0.14/0.13	0.15/0.16
	Prop/%	88/92	88/100	78/96	92/96	88/96
	相关性排序	4/4	1/1	5/3	1/2	3/4
秦岭南坡	*Avg*	−0.70/−0.71	0.35/0.66	0.32/0.59	0.76/0.75	0.65/0.61
	Std	0.14/0.12	0.26/0.15	0.28/0.18	0.09/0.09	0.12/0.12
	Prop/%	94/100	47/88	59/82	100/100	100/100
	相关性排序	3/2	5/4	4/5	1/1	2/3
汉江谷地	*Avg*	−0.70/−0.69	0.54/0.75	0.51/0.68	0.73/0.74	0.57/0.55
	Std	0.10/0.10	0.20/0.12	0.17/0.13	0.09/0.09	0.17/0.17
	Prop/%	100/100	89/96	93/93	100/100	89/89
	相关性排序	2/2	5/3	3/4	1/1	4/5

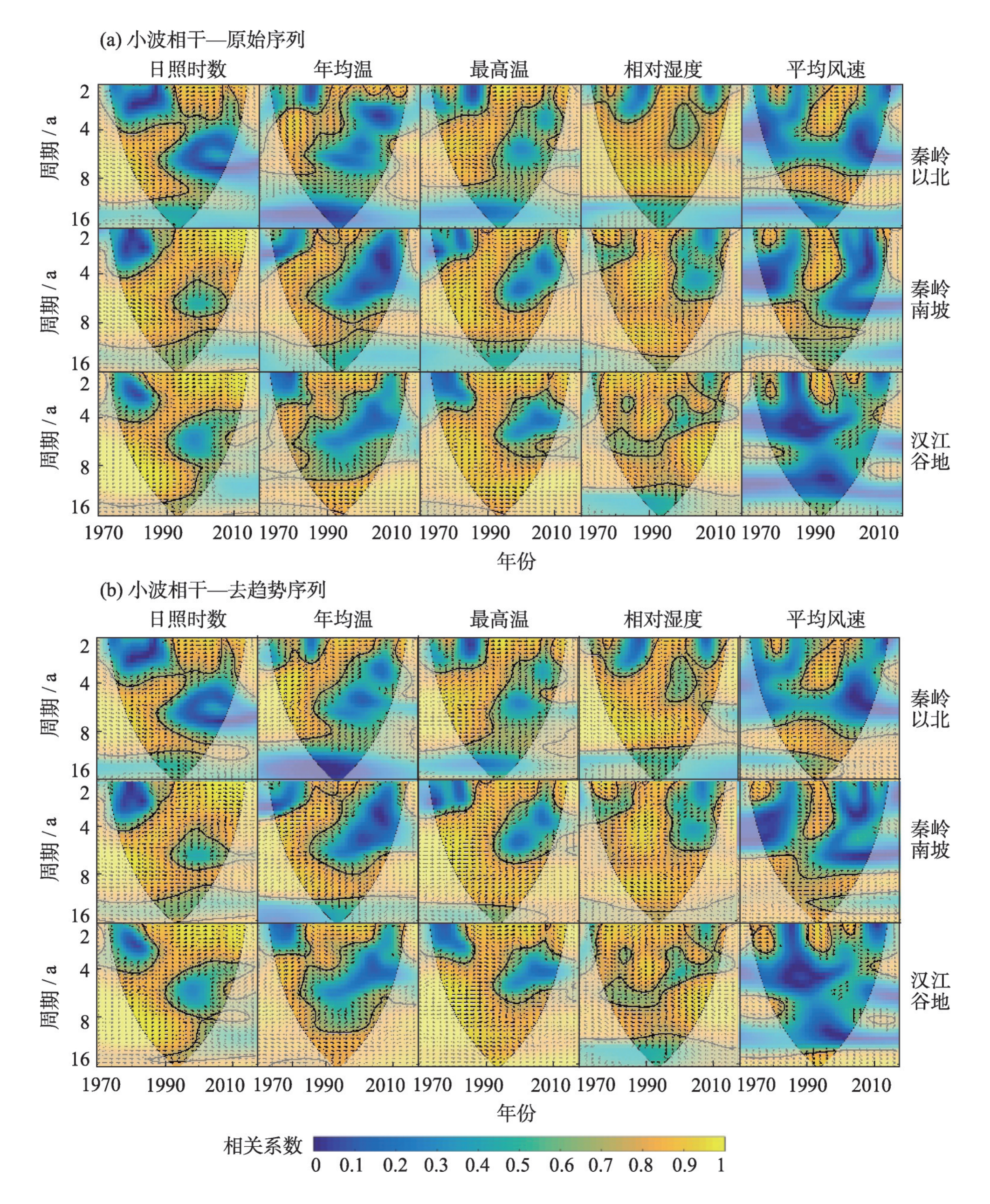
注：*Avg*，平均值；*Std*，标准差；*Prop*,比重。统计显著站点比重为各站相关性通过0.01显著水平检验。"/"前后值分别为原始和去趋势序列结果

温、平均温、日照时数和平均风速呈现正相关关系，与相对湿度呈现负相关关系。也就是说，当秦岭南北气温越高，日照时数增加，平均风速增大，相对湿度偏小时，区域ET_0往往越大（表1）。对比3个分区1970—2017年逐站点气温和ET_0相关系数的平均值（*Avg*）和标准差（*Std*）发现，无论是原始序列，还是去趋势序列，日照与ET_0相关系数不仅均值较高，而且区域内标准差最小，说明日照时数是ET_0变化的主

导因素。关注太阳辐射变化，对理解秦岭南北 ET_0 变化具有重要意义。

综合平均值、标准差与显著相关站点比重(*Prop*)3个维度，得到气象要素对秦岭南北 ET_0 变化的相关性排序，以原始序列为视角，秦岭以北 ET_0 主导气象要素关系为：年均温＜相对湿度＜平均风速＜最高温=日照时数；秦岭南坡：最高温＜年均温＜相对湿度＜平均风速＜日照时数；汉江谷地：最高温＜平均风速＜年均温＜相对湿度＜日照时数。可以看出，温度因素对秦岭南北 ET_0 的影响较小，日照时数对秦岭南北3个分区 ET_0 影响最大，平均风速和相对湿度影响次之(表1)。

去趋势序列结果表明，秦岭以北年均温 *Avg* 也由原始序列的0.47上升为0.65，反映区域相关性差异的 *Std* 下降为0.11，使得年均温相关排序上升到第3位。说明滤除线性趋势后，秦岭以北 ET_0 变化受到太阳辐射、温度变化的影响逐渐上升。对于秦岭南坡和汉江谷地而言，日照时数和相对湿度依然是区



注：黑色粗实线表示通过了显著性水平为0.05的红噪声检验。箭头方向表明时间序列的相关关系，→表示 ET_0 与气象要素呈现正相关；←表示 ET_0 与气象要素呈现负相关；↑表示气象要素提前 ET_0 1/4个周期；↓表示气象要素滞后 ET_0 1/4个周期。

图6 秦岭南北 ET_0 与气象要素的小波相干分析

Fig. 6 Wavelet coherence analysis between ET_0 and meteorological factors in the south and north of Qinling Mountains

域ET_0变化的主要因素，仅是汉江谷地受地形影响，平均风速排序为第5位，而位于秦岭南麓1 000 m以上的气象站点受风速影响相对较大，风速主导相关性排序并无太大变化。

在中国，风速下降是造成"蒸发悖论"的主要原因，特别是在西北和北方地区，风速贡献远高于辐射、气温和相对湿度的变化。同时，太阳辐射下降和相对湿度降低，对蒸发趋势下降具有抑制作用，在一定程度上抵消了气温导致ET_0增加部分，更加突出风速下降导致ET_0下降的现象[24]。结合本研究结果，位于暖温带和北亚热带的秦岭南北地区，风速并非区域ET_0变化的主导因素，ET_0对太阳辐射变化更为敏感，从而导致"蒸发悖论"现象并不突出，符合蒸发皿蒸发归因相关结论。

由于简单线性相关可能忽略气象要素与ET_0的多时间尺度效应，在此，利用小波相干分析，从多时间尺度再次验证ET_0与各气象要素在时频域间的关系（图6）。结果表明：(1) 秦岭南北ET_0与气象要素之间关系，印证了上文分析结果，即ET_0与日照时数、年均温、最高温、平均风速呈正相关，与相对湿度呈负相关；(2) ET_0对5个气象要素响应具有阶段性。以秦岭以北为例，1970—1990年，日照时数、年均温、最高温以4 ~ 12 a的中长时间尺度周期为主；1990—2017年以1 ~ 3 a短时间尺度周期为主；(3) 对于汉江谷地而言，风速与ET_0响应关系呈现零星点状分布，相对湿度对ET_0的响应具有全时域性，说明相对湿度对ET_0的影响持久连续；(4) 对比去趋势和原始序列小波相干结果，两者反映气象要素与ET_0变化规律具有一致性，说明非线性方法主导下，气象要素趋势信息对ET_0归因影响相对较小。

4 结论与展望

基于1970—2017年气象站点气温、潜在蒸发、日照时数、平均风速等观测数据，对秦岭南北ET_0与气温时空响应关系进行分析，并探讨两者相关性时空变化主要因素。得到结论如下：

(1) 时间变化特征。1970—2017年秦岭南北3个分区气温和ET_0变化具有同步性，共同表现为：区域气温上升，ET_0往往上升，不存在"蒸发悖论"现象。但是，气温和ET_0正相关关系强弱存在阶段性，以1989年和2000年为节点，前期去趋势相关性明显提高，后期则呈现减弱趋势，呈现出"上升—下降—上升"的变化过程。

(2) 空间变化特征。无论滑动窗口调整，还是去趋势分析，秦岭南北气温与ET_0均呈现正相关，秦岭以北的关中平原和汉江谷地气温和ET_0正相关更加稳定，秦岭南坡相关关系稳定性较弱，西秦岭地区是气温和ET_0的弱相关区。在变化趋势上，秦岭南北气温和ET_0相关性呈现出"高相关区减弱，低相关区增加"的空间特征。

(3) 主导影响因素。相关综合系数和小波相干两个视角分析发现，位于暖温带和北亚热带的秦岭南北地区，风速并非区域ET_0变化的主导因素，ET_0对太阳辐射变化更为敏感，从而导致"蒸发悖论"现象并不突出。对秦岭南坡和汉江谷地而言，日照时数和相对湿度是区域ET_0变化的主要因素，而汉江谷地受地形因素影响，平均风速影响相对较小。

关于秦岭南北气温与ET_0变化的研究，未来还有许多值得探索的方向。(1) 实际蒸发规律验证。在实际蒸发观测中，2000年前后观测站点将前期D20蒸发皿更换为610B，导致蒸发数据呈现不连续性，加之蒸发数据缺测较多，制约着当前蒸发趋势和归因研究。针对上述问题，WANG等开发Pen-Pan-V3模型，对实际蒸发变化进行模拟，可以为未来研究秦岭南北蒸发变化提供新的思路[36]。(2) 蒸散发反演模型。传统的蒸散发观测多以地面站点观测为主，受制于观测站少，气象资料时间序列短等约束，很难进行大范围蒸散量时空分布研究。遥感数据具有多时空分辨率，为大尺度蒸散发预测提供技术手段[37]。(3) 蒸发变化与环流响应。秦岭南北气候变化受到孟加拉湾、中国南海和西太平洋海温异常共同影响。如何识别关键海区，挖掘海温异常与区域蒸发变化的响应关系，提取可预报、可预警的信息，进而关注蒸发与水资源、生态系统响应关系，为区域社会—经济可持续发展提供理论基础。

参考文献(References)

[1] CHAHINE M T. The hydrological cycle and its influence on climate[J]. Nature, 1992, 359(6394): 373-380.

[2] WANG W, LEE X H, XIAO W, et al. Global lake evaporation ac-

celerated by changes in surface energy allocation in a warmer climate[J]. Nature Geoscience, 2018, 11(6): 410-414.

[3] GAO Y F, ZHAO C Y, MUHAMMAD W A, et al. Actual evapotranspiration of subalpine meadows in the Qilian Mountains, northwest China[J]. Journal of Arid Land, 2019, 11(3): 371-384.

[4] FAN Z X, THOMAS A. Decadal changes of reference crop evapotranspiration attribution: Spatial and temporal variability over China 1960—2011[J]. Journal of Hydrology, 2018, 560: 461-470.

[5] WEN J, QIN R M, ZHANG S H, et al. Effects of long-term warming on the aboveground biomass and species diversity in an alpine meadow on the Qinghai-Tibetan Plateau of China[J]. Journal of Arid Land, 2020, 43(2):252-266.

[6] XING W, WANG W, SHAO Q, et al. Periodic fluctuation of reference evapotranspiration during the past five decades: Does evaporation paradox really exist in China[J]. Scientific Reports, 2016, 6: 39503-39514.

[7] WANG K, LIU X, TIAN W, et al. Pan coefficient sensitivity to environment variables across China[J]. Journal of Hydrology, 2019, 572: 582-591.

[8] 秦榕, 李林超, 杨霰, 等. 新疆地区蒸发皿蒸发量变化及基于小波的周期分析[J]. 干旱区地理, 2018, 41(5): 954-962. [QIN Rong, LI Linchao, YANG San, et al. Change of pan evaporation in Xinjiang and its periods based on wavelet analysis[J]. Arid Land Geography, 2018, 41(5): 954-962.]

[9] 任修琳, 李宏亮, 张玉虎, 等. 2000—2015年三江平原主要作物需水量特征及影响因素分析[J]. 干旱区地理, 2019, 42(4): 854-866. [REN Xiulin, LI Hongliang, ZHANG Yuhu, et al. Water requirement characteristics and influencing factors of main crops in the Sanjiang Plain from 2000 to 2015[J]. Arid Land Geography, 2019, 42(4): 854-866.]

[10] 钟巧, 焦黎, 李稚, 等. 博斯腾湖流域潜在蒸散发时空演变及归因分析[J]. 干旱区地理, 2019, 42(1): 103-112. [ZHONG Qiao, JIAO Li, LI Zhi, et al. Spatial and temporal changes of potential evapotranspiration and its attribution in the Bosten Lake Basin[J]. Arid Land Geography, 2019, 42(1): 103-112.]

[11] 刘闻, 曹明明, 邱海军, 等. 渭河流域关中段潜在蒸发量时空变化特征[J]. 地理科学, 2014, 34(9): 1145-1152. [LIU Wen, CAO Mingming, QIU Haijun, et al. Spatial and temporal change of the potential evapotranspiration in Weihe River Basin: A case study in Guanzhong Area[J]. Scientia Geographica Sinica, 2014, 34(9): 1145-1152.]

[12] RODERICK M L, FARQUHAR G D. The cause of decreased pan evaporation over the past 50 years[J]. Science, 2002, 298(5597): 1410-1411.

[13] BRUTSAERT W, PARLANGE M B. Hydrologic cycle explains the evaporation paradox[J]. Nature, 1998, 396(6706): 30.

[14] WANG W, SHAO Q, PENG S, et al. Reference evapotranspiration change and the causes across the Yellow River Basin during 1957—2008 and their spatial and seasonal differences[J]. Water Resources Research, 2012, 48(5): 5530-5556.

[15] 蒋冲, 王飞, 刘思洁, 等. “蒸发悖论”在秦岭南北地区的探讨[J]. 生态学报, 2013, 33(3): 844-855. [JIANG Chong, WANG Fei, LIU Sijie, et al. Evaporation paradox in the northern and southern regions of the Qinling Mountains[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(3): 844-855.]

[16] MACEK U, BEZAK N, ŠRAJ M. Reference evapotranspiration changes in Slovenia, Europe[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2018, 260: 183-192.

[17] VICENTE-SERRANO S M, BIDEGAIN M, TOMAS-BURGUERA M, et al. A comparison of temporal variability of observed and model-based pan evaporation over Uruguay (1973—2014)[J]. International Journal of Climatology, 2018, 38(1): 337-350.

[18] RAYNER D P. Wind run changes: The dominant factor affecting pan evaporation trends in Australia[J]. Journal of Climate, 2007, 20(14): 3379-3394.

[19] 李敏敏, 延军平. “蒸发悖论”在北方农牧交错带的探讨[J]. 资源科学, 2013, 35(11): 2298-2307. [LI Minmin, YAN Junping. The evaporation paradox in the farming-pastoral ecotone of northern China [J]. Resources Science, 2013, 35(11): 2298-2307.]

[20] 代海燕, 李丹, 娜日苏, 等. 内蒙古干湿环境演变与地区生态建设优势气候背景分析[J]. 干旱区地理, 2019, 42(4): 745-752. [DAI Haiyan, LI Dan, NA Risu, et al. Dry and wet environment evolution and climatic background analysis of regional ecological construction in Inner Mongolia[J]. Arid Land Geography, 2019, 42 (4): 745-752.]

[21] 马雪宁, 张明军, 王圣杰, 等. “蒸发悖论”在黄河流域的探讨[J]. 地理学报, 2012, 67(5): 645-656. [MA Xuening, ZHANG Mingjun, WANG Shengjie, et al. Evaporation paradox in the Yellow River Basin[J]. Acta Geographica Sinica, 2012, 67(5): 645-656.]

[22] LI M, CHU R, SHEN S, et al. Dynamic analysis of pan evaporation variations in the Huai River Basin: A climate transition zone in eastern China[J]. Science of the Total Environment, 2018, 625: 496-509.

[23] GAO W, WANG Z, HUANG G. Spatiotemporal variability of actual evapotranspiration and the dominant climatic factors in the Pearl River Basin, China[J]. Atmosphere, 2019, 10(6): 340-360.

[24] 王婷婷, 孙福宝, 章杰, 等. 基于析因数值实验方法的蒸发皿蒸发归因研究[J]. 地理学报, 2018, 73(11): 2064-2074. [WANG Tingting, SUN Fubao, ZHANG Jie, et al. A new method to attribute changes of pan evaporation: The experimental detrending approach[J]. Acta Geographica Sinica, 2018, 73(11): 2064-2074.]

[25] 李双双, 芦佳玉, 延军平, 等. 1970—2015年秦岭南北气温时空变化及其气候分界意义[J]. 地理学报, 2018, 73(1): 13-24. [LI Shuangshuang, LU Jiayu, YAN Junping, et al. Spatiotemporal variability of temperature in northern and southern Qinling Mountains and its influence on climatic boundary[J]. Acta Geographica Sinica, 2018, 73(1): 13-24.]

[26] 齐贵增, 白红英, 孟清, 等. 1959—2018年秦岭南北春季气候时

空变化特征[J]. 干旱区研究, 2019, 36(5): 1079-1091. [QI Guizeng, BAI Hongying, MENG Qing, et al. Climate change in the Qinling Mountains in spring during 1959—2018[J]. Arid Zone Research, 2019, 36(5): 1079-1091.]

[27] 邓晨晖, 白红英, 高山, 等. 1964—2015年气候因子对秦岭地区植物物候的综合影响效应[J]. 地理学报, 2018, 73(5): 917-931. [DENG Chenhui, BAI Hongying, GAO Shan, et al. Comprehensive effect of climatic factors on plant phenology in Qinling Mountains region during 1964—2015[J]. Acta Geographica Sinica, 2018, 73(5): 917-931.]

[28] 蒋冲, 穆兴民, 马文勇, 等. 秦岭南北地区绝对湿度的时空变化及其与潜在蒸发量的关系[J]. 生态学报, 2015, 35(2): 378-388. [JIANG Chong, MU Xingmin, MA Wenyong, et al. Spatial and temporal variation of absolute humidity and its relationship with potential evaporation in the northern and southern regions of Qinling Mountains[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(2): 378-388.]

[29] 刘彦随, 王仰麟, 傅伯杰. 刘胤汉的地理学思想与学术贡献[J]. 地理学报, 2007, 62(7): 776-781. [LIU Yansui, WANG Yanglin, FU Bojie. Liu Yinhan's geography thoughts and the academic contribution[J]. Acta Geographica Sinica, 2007, 62(7): 776-781.]

[30] 余予, 李俊, 任芝花, 等. 标准序列法在日平均气温缺测数据插补中的应用[J]. 气象, 2012, 38(9): 1135-1139. [YU Yu, LI Jun, REN Zhihua, et al. Application of standardized method in estimating missing daily mean air temperature[J]. Meteorological Monthly, 2012, 38(9): 1135-1139.]

[31] 朱国锋, 何元庆, 蒲焘, 等. 1960—2009年横断山区潜在蒸发量时空变化[J]. 地理学报, 2011, 66(7): 905-916. [ZHU Guofeng, HE Yuanqing, PU Tao, et al. Spatial distribution and temporal trendsin potential evaporation over Hengduan[J]. Acta Geographica Sinica, 2011, 66(7): 905-916.]

[32] PARTAL T. Modelling evapotranspiration using discrete wavelet transform and neural networks[J]. Hydrological Processes: An International Journal, 2009, 23(25): 3545-3555.

[33] GRINSTED A, MOORE J C, JEVREJEVA S. Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series[J]. Nonlinear Processes in Geophysics, 2004, 11(5/6): 561-566.

[34] YANG S, WANG X L, WILD M. Homogenization and trend analysis of the 1958—2016 in situ surface solar radiation records in China[J]. Journal of Climate, 2018, 31(11): 4529-4541.

[35] 辛蕊, 段克勤. 2017年夏季秦岭降水的数值模拟及其空间分布[J]. 地理学报, 2019, 74(11): 2329-2341. [XIN Rui, DUAN Keqin. Numerical simulation and spatial distribution of summer precipitation in the Qinling Mountains[J]. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(11): 2329-2341.]

[36] WANG K W, LIU X M, LI Y H, et al. A generalized evaporation model for Chinese pans[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2018, 123(19): 10943-10966.

[37] 高瑜莲, 柳锦宝, 柳维扬, 等. 近14 a新疆南疆绿洲地区地表蒸散与干旱的时空变化特征研究[J]. 干旱区地理, 2019, 42(4): 830-837. [GAO Yulian, LIU Jinbao, LIU Weiyang, et al. Spatio-temporal variation characteristics of surface evapotranspiration and drought at the oasis area of the southern Xinjiang in recent 14 years[J]. Arid Land Geography, 2019, 42(4): 830-837.]

Spatiotemporal relationship between evaporation and temperature in the south and north of Qinling Mountains and its influential factors

WANG Xiao-meng[1,2], YAN Jun-ping[1,2], LI Shuang-shuang[1,2], YAN De-li[1,2], WAN Jia[1,2,3]

(1 *School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi' an 710119, Shaanxi, China;*
2 *National Demonstration Center for Experimental Geography Education, Shaanxi Normal University, Xi' an 710119, Shaanxi, China;* 3 *North Mizu University, Yinchuan 750021, Ningxia, China)*

Abstract: Evaporation (ET_0) is an important part of the hydrological cycle. A detailed analysis of the relationship between ET_0 and meteorological factors is of great significance for water resources, ecological restoration and reconstruction, and sustainable development of social and economic in China's important ecological transition zone. In this paper, based on the data from 70 meteorological stations in the south and north of Qinling Mountains during 1970—2017, potential evaporation was first calculated using FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) Penman-Monteith model. Moreover, variation of temperature and ET_0 in the south and north of Qinling Mountains is analyzed and the relationship between ET_0 and meteorological factors i.e., temperature, wind speed, sunshine duration, relative humidity are investigated to determine which factor primarily influences ET_0 using a sliding correlation coefficient and wavelet coherence. The results are as follow: based on the mutual correspondence of trends, there is uncertainty in the response relationship between ET_0 and temperature in the south and north of Qinling Mountains. It is not a simple reverse correspondence, that is, the higher the temperature, the more the evaporation. Based on the sliding correlation coefficient, whether we adjusted the size of sliding correlation window or divided the different time periods, there is always a significant positive correlation between ET_0 and temperature, implying that the existence of "evaporation paradox" phenomenon in the study region could not be detected. However, there is a spatiotemporal difference in the correlation between the temperature and ET_0 in the south and north of Qinling Mountains. In terms of the relationship between temperature and evaporation, 1993 was a turning change point since the correlation in the whole period increased initially and then decreased. In terms of spatial variation, regardless of the sequence (original or detrending) and sliding correlation window (11 a or 21 a), the correlation pattern of temperature and ET_0 in the south and north of Qinling Mountains has not changed much, while a weak correlation is observed in the western part of Qinling Mountains. For the influence of meteorological factors change on ET_0 change, it is well established that with the observed decreased sunshine duration and wind speed and increased relative humidity, the ET_0 has been decreasing over the past 48 a, which confirmed three existing assumptions: (1) the reductions in sunshine duration is the first factor for the decline in ET_0 resulting from the evidences in three sub-regions in the south and north of Qinling Mountains, (2) the decreasing wind speed is the second factor for the decline in both northern and south piedmont of Qinling Mountains, and (3) the increasing change in relative humidity exacerbated the decrease of ET_0 in Hanjiang River Basin. However, temperature is the last related factor to ET_0 in south and north of Qinling Mountains. The interaction of multiple factors may influence the variation of ET_0 rate, which is the main reason for the complexity of the 'evaporation paradox' in south and north of Qinling Mountains.

Key words: climate change; potential evaporation; evaporation paradox; trend analysis; the south and north of Qinling Mountains